

517,706

13 DEC 2004

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
31 décembre 2003 (31.12.2003)

PCT

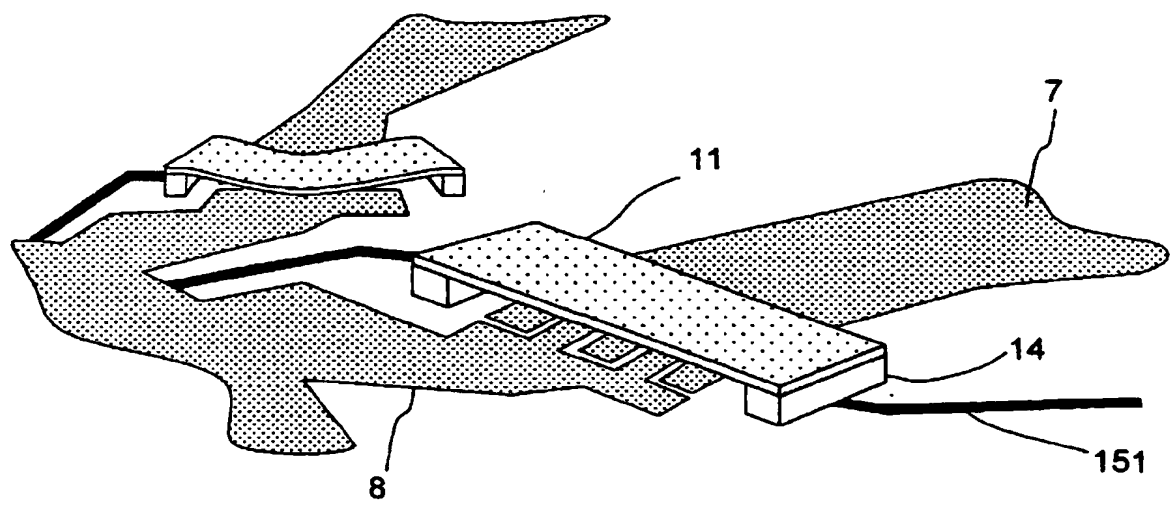
(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2004/001899 A1**

- (51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : **H01Q 3/46**,  
9/06, 21/06
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2003/001803
- (22) Date de dépôt international : 13 juin 2003 (13.06.2003)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
02/07743 21 juin 2002 (21.06.2002) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
**THALES** [FR/FR]; 173, boulevard Haussmann, F-75008  
Paris (FR).

- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **CHAR-  
RIER, Michel** [FR/FR]; Thales Intellectual Property,  
31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil cedex  
(FR). **DEAN, Thierry** [FR/FR]; Thales Intellectual Prop-  
erty, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil  
cedex (FR). **ZIAEI, Afshin** [FR/FR]; Thales Intellectual  
Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil  
cedex (FR). **LEGAY, Hervé** [FR/FR]; Thales Intellectual  
Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil  
cedex (FR). **PINTE, Béatrice** [FR/FR]; Thales Intellectual  
Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil  
cedex (FR). **GILLARD, Raphaël** [FR/FR]; Thales Intel-  
lectual Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117  
Arcueil cedex (FR). **GIRARD, Etienne** [FR/FR]; Thales  
Intellectual Property, 31-33, avenue Aristide Briand,  
F-94117 Arcueil cedex (FR). **MOULINET, Ronan**  
[FR/FR]; Thales Intellectual Property, 31-33, avenue  
Aristide Briand, F-94117 Arcueil cedex (FR).  
[Suite sur la page suivante]

(54) Title: PHASE-SHIFTING CELL FOR ANTENNA REFLECTOR

(54) Titre : CELLULE DEPHASEUSE POUR RESEAU REFLECTEUR D'ANTENNE



(57) Abstract: The invention concerns phase-shifting cells constituting passive reflector arrays of antennae with reconfigurable orientation emitting in the microwave domain. More particularly, the invention concerns, in the context of phase-shifting cells with dipole wires (7) with star-shaped angular distribution, a novel type of switch consisting of a MEMS device including essentially a suspended micro-membrane (11) which, under the action of an electrostatic force brought about by a control voltage, is sufficiently deformed to ensure an electric connection between the wires (7) enabling a dipole to be formed in the desired orientation. In a particular embodiment, the micro-membrane (11) can be compared to one of the armatures of a capacitor and its deformation corresponds to a significant increase of the capacitance of the capacitor, thereby ensuring the electric connection. This particular switch technology provides the advantages of greater simplicity and enhanced performances as compared to known technologies. The invention provides the main geometrical and technical features enabling optimized performances.

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/001899 A1



(74) Mandataires : CHAVERNEFF, Vladimir etc.; Thales Intellectual Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

(81) États désignés (national) : JP, US.

(84) États désignés (régional) : brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

**Publiée :**

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.*

(57) **Abrége :** L'invention concerne les cellules déphaseuses constituant les réseaux réflecteurs passifs d'antennes à direction d'émission reconfigurable émettant dans le domaine des hyperfréquences. Plus particulièrement, elle décrit, dans le cadre des cellules déphaseuses de type à brins (7) de dipôles à répartition angulaire en étoile, un nouveau type de commutateur constitué d'un micro-dispositif électromécanique comprenant essentiellement une micro-membrane (11) suspendue qui, sous l'action d'une force électrostatique provoquée par une tension de commande, se déforme de façon suffisante pour assurer la liaison électrique entre les brins (7) permettant de former un dipôle dans l'orientation souhaitée. Dans un mode particulier de réalisation, la micro-membrane (11) est assimilable à l'une des armatures d'un condensateur et sa déformation correspond à une augmentation importante de la capacité de ce condensateur, assurant ainsi la liaison électrique. Cette technologie de commutateur présente les avantages d'une plus grande simplicité de réalisation et l'obtention de performances accrues par rapport aux technologies connues. L'invention donne les principales caractéristiques géométriques et technologiques permettant d'obtenir des performances optimisées.

## CELLULE DEPHASEUSE POUR RESEAU REFLECTEUR D'ANTENNE

Le domaine de l'invention est celui des réseaux réflecteurs passifs composés d'une mosaïque de cellules déphaseuses élémentaires pour antenne à direction d'émission reconfigurable fonctionnant dans la gamme des hyperfréquences.

Dans un grand nombre d'applications, il est nécessaire de pouvoir orienter le faisceau électromagnétique d'émission d'une antenne dans la direction souhaitée. Les applications possibles sont notamment :

- les télécommunications spatiales : suivi de zone au sol dans le cas d'un satellite défilant, minimisation du rayonnement interférant en cas d'utilisation simultanée de plusieurs signaux, reprogrammation de l'antenne liée à une évolution de trafic et redondance en vol pour pallier des antennes défaillantes ;
- les applications embarquées sur aéronefs : communications avion-satellite et applications aux radars ;
- les applications sol : communications en ondes millimétriques et applications aux radars météo.

Pour réaliser cette orientation, il existe trois techniques possibles. Il est possible d'orienter mécaniquement toute l'antenne dans la direction souhaitée. Cette solution nécessite des dispositifs de positionnement mécaniques complexes à mettre en œuvre dans le cas, par exemple, d'applications spatiales. Dans une seconde solution, on réalise une antenne dite active composée d'une pluralité de cellules élémentaires émettrices. En contrôlant la phase des différents signaux émis par chaque cellule, on obtient l'émission dans la direction souhaitée. Cependant, cette solution, bien que plus souple que la précédente, présente les inconvénients d'être chère et de masse élevée.

La troisième possibilité technique est illustrée en figures 1 et 2, elle consiste à réaliser une antenne à partir d'une source émettrice 1 unique portée par un bras 2 qui illumine un réseau réflecteur 3. L'ensemble est commandé par un module électronique de commande du signal 5. Le réseau

réflecteur est composé d'une mosaïque de cellules 4 déphaseuses passives généralement disposées en nid d'abeille qui vont réémettre un faisceau dans la direction souhaitée. Pour contrôler la direction de réémission, il suffit alors de contrôler le déphasage introduit par chaque cellule. Cette solution présente, comme l'antenne active, l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles. Elle n'en a cependant pas les inconvénients : la mise en œuvre d'une seule source puissante étant plus simple et moins coûteuse à réaliser que celle d'une multitude de sources indépendantes.

Il existe plusieurs solutions pour réaliser les cellules déphaseuses élémentaires. Une première solution consiste à faire transiter puis réfléchir l'onde de longueur d'onde  $\lambda$  dans un guide d'onde de longueur  $L$  donnée. Le déphasage  $\phi$  introduit est alors proportionnel au rapport  $L/\lambda$ . On obtient ainsi le déphasage souhaité en adaptant la longueur du guide d'onde. Ce déphasage dépend également, par principe même, directement de la longueur d'onde du signal émis et par conséquent, ce type de dispositif ne peut fonctionner que pour des bandes spectrales d'émission étroites.

Pour pallier cet inconvénient, un type de dispositif permet d'obtenir un déphasage dont la valeur est quasi-indépendante de la longueur d'onde (James P. Montgomery : A Microstrip ReflectArray Antenna Element – Antenna Applications Symposium – Sep. 20-22, 1978, pp 1-16, University of Illinois). Celui-ci est adapté à des ondes émises en polarisation circulaire.

Le schéma de principe de ce type de dispositif est décrit en figures 3 et 4. La cellule déphaseuse comprend principalement un substrat diélectrique plan 6 d'épaisseur égale à environ le quart de la longueur d'onde centrale d'utilisation sur lequel on dépose sur la partie inférieure un plan de masse 10 et, sur la partie supérieure un nombre pair de brins de dipôles conducteurs 7 disposés de façon régulière autour d'un disque central 8 également conducteur. Des dispositifs de commutation 9 permettent de relier sur commande deux brins diamétralement opposés au disque central. Lorsque deux brins sont ainsi reliés au disque, ils constituent un dipôle rayonnant ayant une orientation géométrique donnée, les autres brins non reliés ne rayonnant pas ou très faiblement.

Le principe de fonctionnement est le suivant : soit une onde polarisée circulairement tombant sur une cellule déphaseuse dont deux des brins sont reliés pour former un dipôle, on démontre que si le vecteur champ

électrique représentant cette onde circulaire forme au niveau de la surface du dipôle un angle de déphasage  $+\theta$  avec la direction dudit dipôle, alors le champ électrique réémis fera avec la direction du dipôle un angle de déphasage  $-\theta$ . En fonction des dipôles créés dans chaque cellule déphaseuse, il devient ainsi possible de contrôler le déphasage apporté et par conséquent l'angle de réémission du faisceau. L'avantage majeur de cette disposition est que le déphasage introduit est ainsi quasi-indépendant de la longueur d'onde du signal.

Une des principales difficultés technologiques de ce type de cellule déphaseuse est la réalisation des dispositifs de commutation. Chaque réseau réflecteur peut comporter plusieurs dizaines de cellules déphaseuses et par conséquent plusieurs centaines de dispositifs de commutation. Ils doivent donc être fiables, de taille réduite, typiquement l'encombrement de chaque commutateur ne doit pas excéder quelques centaines de microns, avoir une consommation électrique faible, et ne pas parasiter le fonctionnement du dipôle en hyperfréquence.

Le brevet US 5 835 062 (Flat panel-configured electronically steerable phased array antenna having spatially distributed array of fanned dipole sub-array controlled by triode-configured field emission devices) propose de réaliser les commutateurs à partir de triodes électroniques. Cette solution nécessite la réalisation et l'implantation pour chaque triode de commutateur de micro-cathodes coniques et de micro-anodes annulaires. Ces dispositifs nécessitent également pour fonctionner une puissance électrique importante compte-tenu du grand nombre de commutateurs par réseau réflecteur.

L'invention propose, quant à elle, une solution alternative permettant de simplifier la réalisation du dispositif et de réduire la puissance électrique dissipée. L'objet de l'invention est de réaliser les commutateurs à partir de micro-dispositifs électro-mécaniques.

Le principe de fonctionnement de ce type de dispositif est décrit de façon schématique sur les figures 5 et 6 dans le cas le plus simple de l'utilisation en micro-interrupteur. Une membrane ou une poutre métallique 11 de très faible épaisseur est maintenue suspendue par des supports 14 au-dessus de surfaces conductrices 12 et 13 isolées entre elles. L'ensemble

membrane – surfaces conductrices peut être soumis à une tension électrique  $T$ . En l'absence de tension appliquée, la membrane est suspendue au-dessus des surfaces conductrices et il n'y a aucun contact électrique entre celles-ci. Dans ce cas, un courant électrique ne peut passer entre 12 et 13 et on assimile l'ensemble membrane-surfaces conductrices à un interrupteur ouvert. Lorsque l'on soumet l'ensemble membrane-surfaces conductrices à une tension  $T$  croissante, la membrane est soumise à une force électrostatique qui la déforme jusqu'à ce que la membrane entre en contact avec les surfaces conductrices pour une tension  $T_c$ . Le courant électrique peut alors passer de 12 à 13. L'ensemble membrane-surfaces conductrices est équivalent à un interrupteur fermé. On réalise ainsi un micro-interrupteur. Les principaux avantages de ce type de dispositif sont essentiellement :

- les techniques de réalisation qui sont dérivées des technologies classiques de fabrication de circuits micro-électroniques en couches minces, qui permettent d'obtenir des coûts de réalisation faibles, en comparaison d'autres technologies tout en garantissant une fiabilité élevée ;
- Les très faibles puissances électriques consommées, pratiquement nulles ;
- L'encombrement. On réalise ainsi un micro-commutateur dans une surface de l'ordre du dixième de millimètre carré ;
- Les performances en utilisation hyperfréquence. Ce type de commutateur présente des pertes d'insertion très faibles, de l'ordre du dixième de déciBel, bien inférieures à celles de dispositifs assurant les mêmes fonctions.

Plus précisément, l'invention a pour objet une cellule déphaseuse d'un réseau réflecteur reconfigurable pour antenne fonctionnant dans le domaine des hyperfréquences, ledit réseau comportant une pluralité de cellules déphaseuses, chacune desdites cellules déphaseuses comportant plusieurs brins électriquement conducteurs, caractérisé en ce qu'au moins deux desdits brins peuvent être reliés entre eux au moyen d'au moins un dispositif de commutation constitué d'un micro-système électromécanique comprenant une membrane flexible commandable électriquement, les brins ainsi reliés constituant un dipôle rayonnant.

Dans le cadre des réseaux réflecteurs dont la disposition géométrique des brins est en étoile, ladite cellule déphaseuse comporte deux faces planes et parallèles séparées d'une épaisseur représentant environ le quart de la longueur d'onde de la fréquence d'utilisation, ladite première face comportant un réseau en étoile constitué d'un nombre pair de brins électriquement conducteurs tous identiques disposés régulièrement autour d'un disque central également conducteur, chaque brin pouvant être électriquement relié au disque central par un dispositif à commutation dépendant d'une tension de commande, chaque paire de brins diamétralement opposés constituant ainsi, lorsque les deux dispositifs les reliant au disque central sont activés, un dipôle résonnant dans le domaine des fréquences d'utilisation de l'antenne, la seconde face comprenant un plan de masse ; ladite cellule étant caractérisée en ce que le dispositif de commutation est constitué d'un micro-système électromécanique comprenant une membrane flexible soutenue par au moins deux piliers placés entre ladite membrane et la première face de la cellule, ladite membrane étant ainsi placée au-dessus de l'extrémité de chaque brin en regard du disque central et de la partie périphérique dudit disque placée vis-à-vis de cette extrémité ; ladite membrane, lorsque la tension de commande est appliquée, étant déformée par la force électrostatique résultante de façon suffisante pour assurer la liaison électrique entre l'extrémité du brin et la partie périphérique correspondante du disque central.

Avantageusement, le dispositif de commutation est de type condensateur et la liaison électrique correspond à une forte augmentation de sa capacité. Un fonctionnement du micro-commutateur en simple interrupteur avec contact électrique entre la membrane flexible et les pièces du dipôle présente l'inconvénient d'avoir une très faible fiabilité. Dans le domaine des fréquences d'utilisation considéré, l'utilisation d'un micro-condensateur à faible capacité, typiquement variant du femtoFarad en circuit ouvert au picoFarad en circuit fermé permet d'obtenir un excellent couplage en position fermée et une très bonne isolation en position ouverte tout en augmentant de façon considérable la fiabilité du dispositif.

Avantageusement, le rapport entre la valeur de la capacité du condensateur en l'absence de tension de commande et la valeur de la capacité lorsque la tension de commande est appliquée est de l'ordre du

centième. Dans ce cas, les armatures du condensateur sont constituées d'une part de la membrane flexible et d'autre part de l'extrémité du brin et de la partie périphérique du disque correspondant placés sous cette membrane, l'isolement électrique étant assuré par une couche de matériau diélectrique recouvrant les brins et le disque. Ce matériau est préférentiellement du nitrure de silice. Les paramètres géométriques et mécaniques de la membrane sont dimensionnés de telle sorte que la tension de commande à appliquer pour assurer la commutation est grande devant les tensions parasites possibles. Cette tension de commande vaut typiquement trente volts. La fiabilité du dispositif, le temps de commutation et la tension de commande dépendent en partie des caractéristiques géométriques de la membrane. Le meilleur compromis est obtenu lorsque la membrane se présente sous la forme d'un parallélépipède rectangle de faible épaisseur, la largeur du rectangle valant typiquement cent microns, sa longueur trois cents microns et son épaisseur sept cents nanomètres. Les matériaux utilisés pour la réalisation de la membrane sont avantageusement l'Or, l'Aluminium ou des alliages de Tungstène et de Titane disposés en couches. En l'absence de tension de commande, les armatures du condensateur sont séparées d'environ trois microns.

Avantageusement, l'extrémité du brin et la partie du disque central en regard placés sous la membrane composent un peigne de doigts interdigités, le nombre total de doigts est préférentiellement de cinq. La forme en peignes interdigités des deux surfaces de l'extrémité du brin et du disque central en regard permettent d'optimiser l'effet capacitif.

Les tensions de commande des dispositifs à commutation passent par les brins au moyen de lignes résistives internes et les membranes flexibles sont toutes reliées à la masse électrique au moyen également d'autres lignes résistives internes. Le matériau utilisé pour réaliser les différentes liaisons électriques est préférentiellement de l'or. La valeur de l'impédance des lignes résistives à la fréquence d'utilisation est suffisamment élevée pour isoler l'ensemble des brins, du disque central et des dispositifs de commutation de l'extérieur.

Avantageusement, la cellule est de forme hexagonale et comporte douze brins, chaque brin ayant préférentiellement une forme évasée, l'angle d'évasement étant voisin de 20 degrés. La forme hexagonale de la cellule



permet un pavage complet et uniforme de l'espace du réseau réflecteur. Par principe, le déphasage introduit par chaque cellule est discret, l'angle minimal de déphasage étant inversement proportionnel au nombre de brins. Il est, bien entendu intéressant de diminuer cet angle en augmentant le nombre de brins. Cependant, celui-ci est limité par la complexité des systèmes d'interconnexion lorsque le nombre de brins à commander s'accroît, la nécessaire limite de miniaturisation des commutateurs et les interférences possibles entre brins si leur espacement se resserre. En pratique, douze brins par cellule sont un bon compromis entre la complexité technologique et l'angle minimal de déphasage. Le coefficient de réflexion de l'onde par le dipôle dépend de sa taille qui doit être classiquement voisine d'une demi-longueur d'onde, mais également de sa forme, les formes faiblement évasées étant bien adaptées pour obtenir une bonne résonance du dipôle.

Avantageusement, l'ensemble électronique de ladite cellule formé par les brins, le disque central, les dispositifs de commutation et les différentes lignes résistives amenant les tensions de commande et la masse électrique est implanté sur un substrat transparent aux ondes hyperfréquences, le matériau utilisé peut être du silicium, du quartz ou du verre, notamment de marque Pyrex. Ledit substrat se présente sous la forme d'un cylindre droit à faces planes et parallèles, de base circulaire ou hexagonale et est centré sur le disque central de la cellule.

Avantageusement, les parties supérieures des substrats qui comportent les disques centraux et les différents dispositifs de commutation sont protégées par un ou plusieurs capots de protection. Chaque cellule peut disposer de son propre capot de protection ou le capot peut être unique, commun à l'ensemble du réseau réflecteur. Les dispositifs de commutation qui sont des pièces mécaniques de très faibles dimensions, de l'ordre de quelques microns à quelques centaines de microns nécessitent un capot permettant de les protéger des éléments extérieurs comme les fluides ou la poussière qui risqueraient de dégrader fortement leurs performances. En particulier, les performances des membranes métalliques peuvent être gravement altérées par l'oxydation.

Avantageusement, le substrat commun à l'ensemble du réseau réflecteur comporte deux faces planes et parallèles, la face supérieure

portant les différents substrats en verre correspondant à chaque cellule, et la face opposée comportant un plan de masse, le matériau de ce substrat étant un matériau transparent aux ondes hyperfréquences et électriquement isolant. Préférentiellement, ce matériau est réalisé à base de fibres de verre et de téflon. La société NELTEC commercialise un matériau de ce type sous la marque METCLAD.

Avantageusement, la connectique de chaque cellule est assurée par un pavage en nid d'abeille de trous de connexion circulaires réalisés dans le substrat commun et disposés en hexagone, chacun des hexagones étant centré sur un disque central de cellule, chacune des lignes résistives internes d'une cellule issues des brins ou des membranes étant reliée à ces trous par d'autres liaisons résistives de connexion externes implantées sur le substrat commun, les lignes résistives internes implantées sur les substrats en verre de chaque cellule étant reliées aux lignes résistives externes implantées sur le substrat du réseau réflecteur au moyen de fils de connexion câblés.

Avantageusement, les lignes de trous de connexion sont communes à deux cellules adjacentes et chaque hexagone de plots de connexion comporte alors un nombre de plots égal à au moins deux fois le nombre total de brins de chaque cellule augmenté de deux de façon à pouvoir assurer la connexion de deux cellules adjacentes.

Il est nécessaire d'assurer l'isolation de chaque cellule de façon qu'une configuration de cellule donnée ne parasite pas les cellules environnantes. Cette isolation est assurée de deux façons ; d'une part par les trous de connexion qui vont jouer un rôle de barrière électromagnétique si leur espacement est suffisamment faible devant la longueur d'onde et d'autre part par des ensembles de parois métalliques de séparation disposées en hexagone au-dessus des trous de connexion, lesdites parois étant reliées entre elles et reliées à la masse par des pions de centrage métalliques situés d'une part dans les parois et d'autre part dans certains trous de connexion réservés à cet effet. L'ensemble des parois des cellules forme alors une grille en nid d'abeille située au-dessus du réseau réflecteur.

Avantageusement, l'ensemble du réseau réflecteur est recouvert d'un traitement diélectrique multicouches permettant d'augmenter l'efficacité

de la cellule lorsque l'incidence du rayonnement incident ou réfléchi est importante.

De façon générale, le procédé de réalisation du réseau réflecteur comprend les étapes suivantes :

- Réalisation du substrat circuit imprimé commun aux cellules
  - Dépôt du plan de masse
  - Réalisation des plots de connexion électrique : trous et plages métallisés
- Réalisation des substrats micro-électroniques centraux des cellules
- Dépôts sur ces substrats des différents dispositifs électroniques
  - Réalisation des brins, du disque central et des lignes résistives
  - Réalisation des dispositifs de commutation
- Protection des dispositifs de commutation par la mise en place de capots.
- Mise en place des substrats centraux sur le substrat commun
- Raccordement électrique des lignes résistives aux plots de connexion
- Mise en place des pions de centrage
- Pose des grilles d'isolation sur les pions de centrage

Avantageusement, le procédé de réalisation des commutateurs comprend les sous-étapes suivantes :

- Dépôt d'une couche de matériau diélectrique à l'emplacement des peignes interdigités ;
- Dépôt d'une couche de résine photosensible couvrant au moins l'emplacement de la membrane et de ses piliers supports ;
- Retrait de ladite résine à l'emplacement de chaque pilier ;
- Création des piliers et de la membrane par dépôt d'une couche métallique au moins aux emplacements desdits piliers et de la membrane.
- Retrait de la résine au moins sous la membrane de façon à laisser libre la membrane sur ces piliers.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- La figure 1 représente le schéma de principe d'une antenne selon l'invention.

- La figure 2 représente une vue de dessus du réseau réflecteur montrant le pavage hexagonal des cellules déphaseuses.

- La figure 3 représente le principe général des cellules déphaseuse à dipôles en étoile en vue de dessus. Sur cette vue, les commutateurs sont représentés par de simples interrupteurs. En configuration d'utilisation normale, seulement deux interrupteurs diamétralement opposés sont fermés, les autres étant laissés ouverts.

- La figure 4 représente le même schéma que la figure précédente, mais en coupe.

- La figure 5 représente le principe de fonctionnement d'un commutateur à dispositif électromécanique lorsqu'il est en position OFF, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune différence de potentiel entre la membrane et les surfaces conductrices situées au-dessous.

- La figure 6 représente le principe de fonctionnement d'un commutateur à dispositif électromécanique lorsqu'il est en position ON, c'est-à-dire qu'il existe une différence de potentiel suffisante entre la membrane et les surfaces conductrices situées au-dessous pour que le contact mécanique soit réalisé.

- La figure 7 représente une vue de dessus de deux ensembles de commutation selon l'invention. Sur cette figure, seules sont représentées l'extrémité de deux brins en regard du disque central, la partie du disque central leur faisant face, les liaisons résistives et la membrane de chaque commutateur.

- La figure 8 représente une vue de l'extrémité du brin et de la partie du disque central en regard, montrant les peignes interdigités situés sous la membrane. Seuls les contours de la membrane ont été représentés en pointillés dans un souci de clarté.

- La figure 9 représente une vue en perspective des deux commutateurs de la figure 7, l'un des deux commutateurs est en position OFF (membrane droite), l'autre en position ON (membrane courbe).

- La figure 10 représente une vue de dessus de la cellule selon l'invention. Dans un souci de clarté, les commutateurs sont représentés par des pointillés en position OFF et par un trait plein en position ON.
- La figure 11 représente une première vue en coupe de la cellule selon l'invention passant par le centre de la cellule. Les commutateurs ne sont pas représentés sur cette figure par un souci de clarté.
- La figure 12 représente une seconde vue en coupe de la cellule selon l'invention passant par la périphérie de la cellule, montrant le raccordement d'une paroi métallique sur le substrat commun.
- La figure 13 représente la disposition générale de trois cellules voisines en vue de dessus.

La figure 7 représente une vue de dessus des dispositifs de commutation selon l'invention. Deux brins conducteurs 7 adjacents d'une cellule déphaseuse 4 sont représentés ainsi que la partie du disque central 8 leur faisant face. La zone de commutation de chaque brin est constituée par l'extrémité du brin située en regard du disque central. Le dispositif de commutation comprend essentiellement une membrane 11 disposée au-dessus de la zone de commutation. Les tensions de commande et les mises à la masse sont réalisées au moyen de lignes résistives 151, 154 et 155.

La figure 8 représente une vue détaillée de la zone de commutation. L'extrémité 71 de chaque brin placé du côté du disque central et la partie correspondante 81 du disque placée en regard de cette extrémité composent un peigne de doigts interdigités. La zone de ce peigne constitue la zone de commutation. L'intérêt de cette disposition géométrique est qu'elle permet de répartir la tension de commande venant du brin de façon homogène dans la zone de commutation. Sur la figure 8, à titre d'exemple, cinq doigts sont interdigités, deux appartenant au disque central et trois appartenant à chaque brin. L'ensemble de la zone de commutation est recouvert d'une couche de matériau isolant comme par exemple le nitrure de silice, non représenté sur la figure.

La figure 9 représente une vue en perspective des deux commutateurs représentés en figure 7. Chaque membrane est soutenue par au moins deux piliers 14 disposés de part et d'autre de la zone de commutation. La membrane se trouve ainsi isolée à une certaine distance

au-dessus de la zone de commutation. Cette distance vaut typiquement quelques microns. Ladite membrane métallique a une forme grossièrement parallélépipédique. Cette forme représente un bon compromis entre la résistance mécanique de la membrane qui conditionne sa durée de vie et sa fiabilité et les tensions nécessaires à mettre en œuvre pour obtenir la commutation qui ne doivent pas être trop importantes. Ainsi, pour une membrane de longueur typique trois cents microns, de largeur typique cent microns et d'épaisseur sept cents nanomètres, les tensions de commande sont de l'ordre de trente volts. La membrane est également percée d'une multitude de trous 110 au cours de sa réalisation. Ces trous permettent le passage du solvant permettant la libération de la membrane au cours du processus de réalisation. Par souci de clarté, ces trous ne sont pas représentés sur les différentes figures représentant la membrane, hormis sur la vue de détail de la figure 7. La membrane est métallique. Les métaux et alliages possibles sont préférentiellement l'or, l'aluminium, le tungstène ou le titane.

L'ensemble constitué par la membrane et l'extrémité du brin et la partie du disque central située dessous forment les armatures d'un condensateur dont la capacité au repos vaut quelques femtofarads. Lorsque la membrane est sollicitée, elle se déforme, rapprochant les deux armatures du condensateur. Sa capacité augmente et vaut alors quelques picofarads.

Les figures 10, 11 et 12 représentent la vue de dessus et deux vues en coupe d'une cellule du réseau selon l'invention.

La figure 10 représente la vue de dessus de la cellule. La partie centrale de la cellule 4 comprend un substrat 61 sur lequel est implanté le réseau en étoile des brins 7 électriquement conducteurs constituant les différents dipôles, ledit réseau étant centré sur un disque central 8 électriquement conducteur. Le substrat est électriquement isolant et transparent aux ondes hyperfréquences. Il doit être compatible des technologies d'implantation des différents composants électroniques de la cellule. Ce substrat est, par exemple, du silicium ou du quartz ou du verre, notamment de marque pyrex. Les brins sont nécessairement en nombre pair et disposés symétriquement de façon que chaque brin est un vis-à-vis diamétralement opposé. Chaque paire de brins diamétralement opposé

constitue ainsi un dipôle lorsqu'elle est reliée au disque central par les dispositifs de commutation représentés sur les figures 7, 8 et 9.

Les tensions de commande et les mises à la masse sont réalisées au moyen de lignes résistives 151, 154 et 155 reliées d'une part aux différents brins et aux membranes de commutation et d'autre part à des plots de connexion 161 disposés sur le pourtour du substrat central. Une première série de lignes de commande 151 est connectée à l'extrémité de chaque brin comme il est montré sur la figure 10. Deux lignes de mise à la masse diamétralement opposées 154 relient deux membranes à la masse, les autres membranes et le disque central sont reliées à ces deux membranes par d'autres lignes résistives 155 comme il est montré sur la figure 10. Les lignes résistives 151, 154 et 155 ont une résistance suffisante pour obtenir un isolement électrique complet aux ondes hyperfréquences de l'ensemble des brins et des dispositifs de commutation. Typiquement, les dépôts résistifs ont une résistance ohmique de quelques centaines d'Ohm carré.

Les brins sont préférentiellement de forme évasée de façon à augmenter le rendement du dipôle. L'angle d'évasement fait environ vingt degrés. La longueur de chaque brin vaut environ le quart de la longueur d'onde hyperfréquence d'utilisation. Les substrats centraux correspondant à une cellule donnée sont implantés de façon régulière sur un substrat commun 62 à l'ensemble des cellules 4 du réseau réflecteur. Ce substrat est également électriquement isolant et transparent aux ondes hyperfréquences. Il doit être compatible des technologies d'implantation des différents composants électroniques de la cellule. Ce substrat est réalisé notamment à partir d'un composite à base de fibres de verre et de téflon. Ce type de matériau est commercialisé par la société NELTEC sous la marque METCLAD. L'épaisseur totale du substrat commun et de chaque substrat central vaut environ le quart de la longueur d'onde hyperfréquence d'utilisation, soit de l'ordre de un à deux millimètres compte-tenu des fréquences d'utilisation. Ce substrat comporte sur la face opposée à celle des substrats centraux un plan de masse 10.

Le substrat commun comporte un pavage de plots de connexion électrique 171 et 172 disposés régulièrement suivant un motif hexagonal. Chaque hexagone est centré sur un substrat central de cellule comme il est

indiqué sur les figures 7 et 13 et est composé de six lignes d'au moins six plots de connexion. Les plots de chaque ligne sont régulièrement espacés entre eux. Ils traversent complètement le substrat commun (figure 12).

Chaque cellule est surmontée d'un ensemble de six parois métalliques 18 (figure 12) également disposées en hexagone et placées au-dessus des lignes de plots de connexion, l'ensemble formant une grille en nid d'abeille (figures 10 et 13).

Il existe deux types de plots. Le premier type est utilisé pour relier les lignes résistives de commande à l'extérieur du réseau réflecteur vers le module électronique de commande et sont isolés du plan de masse. Le second type est utilisé d'une part pour fixer mécaniquement les parois métalliques sur le substrat commun au moyen de pions de fixation 172 et d'autre part, pour relier ces parois au plan de masse comme il est indiqué sur la figure 12.

Les plots du premier type sont reliés aux lignes résistives 151 et 154 des substrats communs par d'autres lignes résistives 153 interconnectées au moyen de fils de connexion câblés 152 comme il est indiqué sur la figure 10. Lesdites lignes résistives 153 ont une résistance suffisante pour obtenir un isolement électrique complet aux ondes hyperfréquences de l'ensemble des brins et des dispositifs de commutation. Typiquement, les dépôts résistifs ont une résistance ohmique d'environ un kiloOhm carré. Les plots sont isolés des parois métalliques par des pastilles isolantes 173. La disposition des lignes résistives reliées aux plots d'interconnexion est indiquée sur les figures 10 et 13. Cette disposition permet à la fois d'avoir la même disposition géométrique pour toutes les cellules du réseau et d'autre part de minimiser les longueurs des lignes résistives.

Il est nécessaire de protéger les dispositifs de commutation qui sont mécaniquement fragiles. Cette protection est assurée soit au niveau de chaque cellule par un capot de protection 19 comme il est indiqué sur la figure 11 qui représente une vue en coupe de la cellule. Ce capot 19 doit également être transparent aux ondes hyperfréquences. Ce capot peut également être commun à l'ensemble du réseau réflectif.



Les substrats centraux peuvent également être recouvert d'un traitement diélectrique multicouches de façon à augmenter le rendement des cellules sous forte incidence angulaire.

Le principe de fonctionnement du réseau réflecteur est le suivant :

- Pour obtenir la réflexion des ondes hyperfréquences fournies par l'émetteur dans une direction déterminée, le module électronique calcule pour chaque cellule la disposition géométrique des dipôles à activer.
- Pour chaque cellule, le module électronique génère les tensions de commande qui sont envoyées aux deux brins diamétralement opposés à activer.
- Sous l'effet de la tension, les deux membranes placées au-dessus des brins activés se déforment (figure 9). La capacité existant entre les armatures augmente fortement. L'ordre de grandeur entre les rapports des capacités des deux états du commutateur est environ cent. L'impédance du dispositif de commutation devient négligeable et les deux brins sollicités sont connectés au disque central formant ainsi un dipôle.

Les dispositifs de commutation sont mis en œuvre simultanément pour deux brins opposés par deux commandes en tension séparées, la géométrie du dispositif ne permettant pas de relier les deux brins simultanément au disque central par une commande commune.

De façon générale, le procédé de réalisation du réseau réflecteur comprend les étapes suivantes :

- Réalisation du substrat circuit imprimé commun aux cellules
  - Dépôt du plan de masse
  - Réalisation des plots de connexion électrique : trous et plages métallisés
- Réalisation des substrats micro-électroniques centraux des cellules
- Dépôts sur ces substrats des différents dispositifs électroniques
  - Réalisation des brins, du disque central et des lignes résistives
  - Réalisation des dispositifs de commutation

- Protection des dispositifs de commutation par la mise en place de capots.
- Mise en place des substrats centraux sur le substrat commun
- Raccordement électrique des lignes résistives aux plots de connexion
- Mise en place des pions de centrage
- Pose des grilles d'isolation sur les pions de centrage

Le procédé de réalisation des commutateurs comprend les sous-étapes suivantes :

- Dépôt d'une couche de matériau diélectrique à l'emplacement des peignes interdigités ;
- Dépôt d'une couche de résine photosensible couvrant au moins l'emplacement de la membrane et de ses piliers supports ;
- Retrait de ladite résine à l'emplacement de chaque pilier ;
- Création des piliers et de la membrane par dépôt d'une couche métallique au moins aux emplacements desdits piliers et de la membrane.
- Retrait de la résine au moins sous la membrane de façon à laisser libre la membrane sur ces piliers.

## REVENDEICATIONS

5

1. Cellule (4) déphaseuse d'un réseau réflecteur (3) reconfigurable pour antenne fonctionnant dans le domaine des hyperfréquences, ledit réseau comportant une pluralité de cellules élémentaires déphaseuses identiques, chacune desdites cellules comportant  
10 deux faces planes et parallèles séparées d'une épaisseur représentant environ le quart de la longueur d'onde de la fréquence d'utilisation, ladite première face comportant un réseau en étoile constitué d'un nombre pair de brins (7) électriquement conducteurs tous identiques disposés régulièrement autour d'un disque central (8) également conducteur, chaque brin pouvant  
15 être électriquement relié au disque central par un dispositif à commutation dépendant d'une tension de commande, chaque pair de brins diamétralement opposés constituant ainsi, lorsque les deux dispositifs à commutation les reliant au disque central sont activés, un dipôle résonnant dans le domaine des fréquences d'utilisation de l'antenne, la seconde face  
20 étant constituée par un plan de masse ; ladite cellule étant caractérisée en ce que chaque dispositif de commutation est constitué d'un micro-système électromécanique comprenant une membrane (11) flexible soutenue par au moins deux piliers (14) placés entre ladite membrane et la première face de la cellule, ladite membrane étant ainsi placée au-dessus de l'extrémité (71)  
25 de chaque brin en regard du disque central et de la partie périphérique (81) dudit disque placée vis-à-vis de cette extrémité, ladite membrane, lorsque la tension de commande est appliquée, étant déformée par la force électrostatique résultante de façon suffisante pour assurer la liaison électrique entre l'extrémité du brin et la partie périphérique correspondante  
30 du disque central, ledit dispositif de commutation étant de type condensateur et la liaison électrique correspond à une forte augmentation de sa capacité.

2. Cellule déphaseuse selon la revendication 1, caractérisée en ce que le rapport entre la valeur de la capacité du condensateur en l'absence de

tension de commande et la valeur de la capacité lorsque la tension de commande est appliquée est de l'ordre du centième.

5 3. Cellule déphaseuse selon la revendication 1, caractérisée en ce que les armatures du condensateur sont constituées d'une part de la membrane (11) flexible et d'autre part de l'extrémité du brin (71) et de la partie périphérique (81) du disque correspondant placés sous cette membrane, l'isolement électrique étant assuré par une couche de matériau diélectrique recouvrant les brins et le disque.

10

4. Cellule déphaseuse selon la revendication 3, caractérisée en ce que le matériau diélectrique utilisé est préférentiellement du nitrure de silice ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

15

5. Cellule déphaseuse selon la revendication 1, caractérisée en ce que les paramètres géométriques et mécaniques de la membrane sont dimensionnés de telle sorte que la tension de commande à appliquer pour assurer la commutation est grande devant les tensions parasites possibles.

20

6. Cellule déphaseuse selon la revendication 5, caractérisée en ce que cette tension de commande vaut typiquement trente volts.

25

7. Cellule déphaseuse selon la revendication 5, caractérisée en ce que la membrane a grossièrement la forme d'un parallélépipède rectangle de faible épaisseur, la largeur du rectangle valant typiquement cent microns, sa longueur trois cents microns et son épaisseur sept cents nanomètres.

30

8. Cellule déphaseuse selon la revendication 5, caractérisée en ce que la membrane et les piliers la soutenant sont constitués principalement de couches d'Or, d'Aluminium et de couches d'alliages de Tungstène et de Titane.

9. Cellule déphaseuse selon la revendication 2, caractérisée en ce que, en l'absence de tension de commande, l'espace entre la membrane et

les parties du disque central et du brin placée dessous fait environ trois microns.

10. Cellule déphaseuse selon la revendication 1, caractérisé en  
5 ce que l'extrémité (71) du brin et la partie (81) du disque central en regard placés sous la membrane composent un peigne de doigts interdigités.

11. Cellule déphaseuse selon la revendication 10, caractérisé en  
ce que le nombre total de doigts est de cinq.

10

12. Cellule déphaseuse selon la revendication 1, caractérisée en  
ce que les tensions de commande des dispositifs à commutation passent par  
les brins au moyen de lignes résistives (151) internes et que les membranes  
flexibles sont toutes reliées à la masse électrique au moyen également  
15 d'autres lignes résistives internes (154, 155).

20

13. Cellule déphaseuse selon la revendication 12, caractérisée en  
ce que le matériau utilisé pour réaliser les différentes liaisons électriques est  
préférentiellement de l'or.

25

14. Cellule déphaseuse selon la revendication 12, caractérisée en  
ce que la valeur de l'impédance des lignes résistives à la fréquence  
d'utilisation est suffisamment élevée pour isoler l'ensemble des brins, du  
disque central et des dispositifs de commutation de l'extérieur.

30

15. Cellule déphaseuse selon l'une des revendications 1 à 14,  
caractérisée en ce que la cellule est de forme hexagonale et comporte douze  
brins (7).

16. Cellule déphaseuse selon l'une des revendications 1 à 15,  
caractérisée en ce que chaque brin a une forme évasée, l'angle d'évasement  
étant voisin de 20 degrés.

35

17. Cellule selon l'une des revendications 1 à 16, caractérisée en  
ce que l'ensemble électronique de ladite cellule formé par les brins (7), le

disque central (8), les dispositifs de commutation et les différentes lignes résistives (151, 154, 155) amenant les tensions de commande et la masse électrique est implanté sur un substrat central (61) transparent aux ondes hyperfréquences, ce substrat étant notamment du silicium ou du quartz ou du verre, notamment de marque Pyrex.

18. Cellule selon l'une des revendications 1 à 17, caractérisée en ce que ledit substrat (61) se présente sous la forme d'un cylindre droit à faces planes et parallèles, de base circulaire ou hexagonale et centré sur le disque central de la cellule.

19. Cellule selon l'une des revendications 1 à 18, caractérisée en ce que la partie supérieure du substrat (61) qui comporte le disque central et les différents dispositifs de commutation est protégé par un capot de protection (19) transparent aux ondes électromagnétiques hyperfréquences d'utilisation.

20. Cellule selon l'une des revendications 1 à 19, caractérisée en ce que le substrat (62) commun à l'ensemble du réseau réflecteur comporte deux faces planes et parallèles, la face supérieure portant les différents substrats centraux correspondant à chaque cellule, et la face opposée comportant un plan de masse (10).

21. Cellule selon la revendication 20, caractérisée en ce que ce substrat (62) est réalisé notamment à base de fibres de verre et de téflon, ce substrat pouvant être le matériau ayant comme nom de marque METCLAD commercialisé par la société NELTEC.

22. Cellule selon l'une des revendications 1 à 21, caractérisée en ce que la connectique de chaque cellule est assurée par un pavage de plots de connexion circulaires (171) réalisés dans le substrat commun et disposés en lignes formant un hexagone, chaque hexagone étant centré sur le disque central de chaque cellule, chacune des lignes résistives internes d'une cellule issues des brins ou des membranes étant reliée à ces plots (171) par d'autres liaisons résistives (153) de connexions externes implantées sur le

substrat commun, les lignes résistives internes implantés sur les substrats centraux de chaque cellule étant reliées aux lignes résistives externes implantées sur le substrat du réseau réflecteur au moyen de fils de connexion câblés (152).

5

23. Cellule selon la revendication 22, caractérisée en ce que chaque hexagone de plots de connexion comporte un nombre de plots égal à au moins deux fois le nombre total de brins de chaque cellule augmenté de deux.

10

24. Cellule selon les revendications 22 et 23, caractérisée en ce que les lignes de trous de connexion sont communs à deux cellules adjacentes.

15

25. Cellule selon l'une des revendications 1 à 24, caractérisée en ce que chaque cellule est surmontée d'un ensemble de six parois (18) métalliques de séparation disposées en hexagone au-dessus des trous de connexion, lesdites parois étant reliées entre elles et reliées à la masse par des pions métalliques (172) situés d'une part dans les parois et d'autre part dans certains trous de connexion réservés à cet effet. L'ensemble des parois des cellules forme une grille en nid d'abeille située au-dessus du réseau réflecteur.

20

26. Cellule selon l'une des revendications 1 à 25, caractérisée en ce que l'isolement électrique de chaque cellule vis-à-vis des cellules adjacentes est réalisée, d'une part par les pavages de trous de connexions et d'autre part, par les parois métalliques disposées au-dessus de chaque cellule.

25

27. Cellule selon l'une des revendications 1 à 26, caractérisée en ce que l'ensemble du réseau réflecteur est recouvert d'un traitement diélectrique multicouches.

30

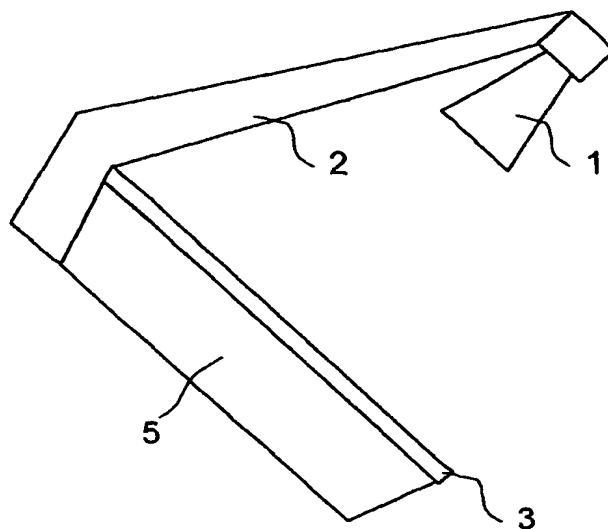
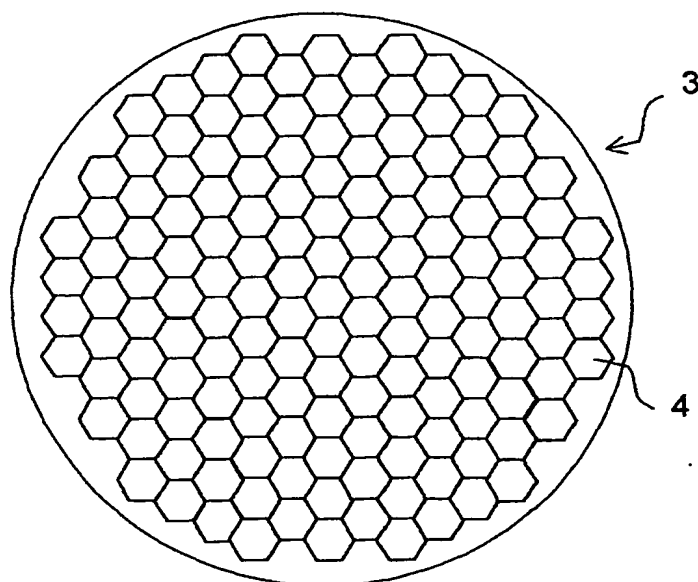
28. Procédé de réalisation de la cellule selon les revendications 1 à 27, caractérisé en ce que l'étape de réalisation des commutateurs comprend les sous-étapes suivantes :

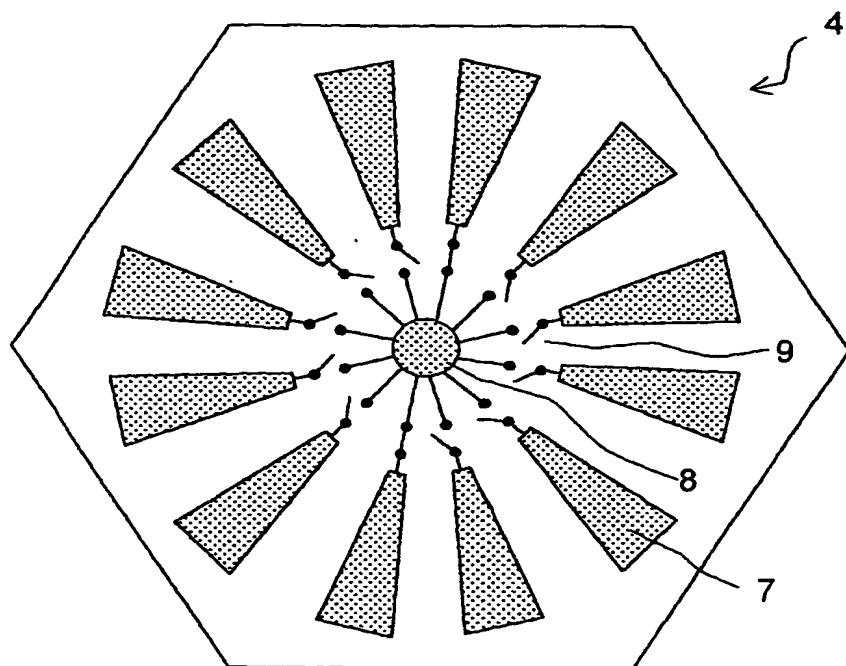
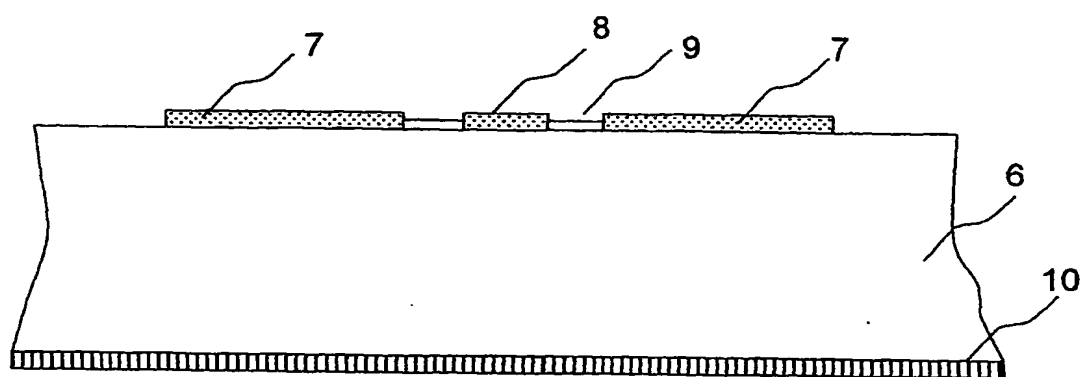
- 5 • Dépôt d'une couche de matériau diélectrique à l'emplacement de la zone de commutation ;
- Dépôt d'une couche de résine photosensible couvrant au moins l'emplacement de la membrane et de ses piliers supports ;
- Retrait de ladite résine à l'emplacement de chaque pilier ;
- 10 • Création des piliers (14) et de la membrane (11) par dépôt d'au moins une couche métallique aux emplacements desdits piliers et de la membrane.
- Retrait de la résine au moins sous la membrane de façon à laisser libre la membrane (11) sur ces piliers (14).

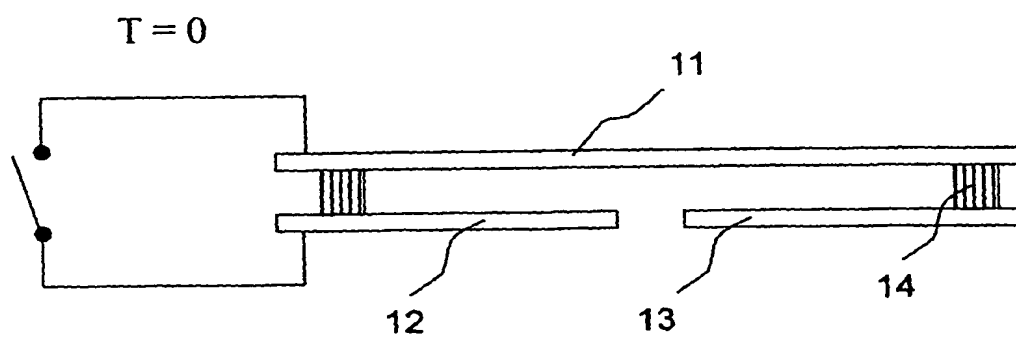
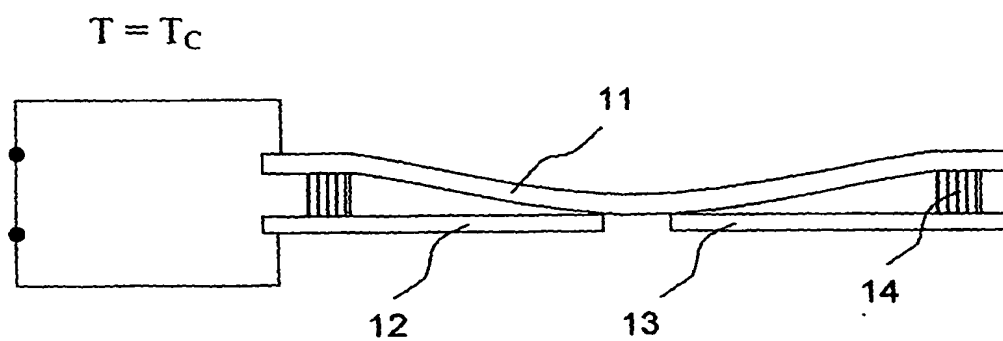
15 29. Procédé de réalisation de la cellule selon les revendications 17 à 27, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- Réalisation du substrat circuit imprimé (62) commun aux cellules (4)
  - 20 • Dépôt du plan de masse (10) ;
  - Réalisation des plots de connexion électrique (171) : trous et plages métallisés ;
- Réalisation des substrats micro-électroniques centraux des cellules (61) ;
- 25 • Dépôts sur ces substrats des différents dispositifs électroniques
  - Réalisation des brins (7), du disque central (8) et des lignes résistives (7, 151, 154, 155) ;
  - Réalisation des dispositifs de commutation ;
- Protection des dispositifs de commutation par la mise en place de capots (19) ;
- 30 • Mise en place des substrats centraux (61) sur le substrat commun (61) ;
- Réalisation et raccordement électrique des lignes résistives (153) aux plots de connexion (171) ;
- 35 • Pose des grilles d'isolation sur les lignes de plots de connexion et mise en place des supports mécaniques (172).



**FIG. 1****FIG. 2**

**FIG. 3****FIG. 4**

**FIG. 5****FIG. 6**

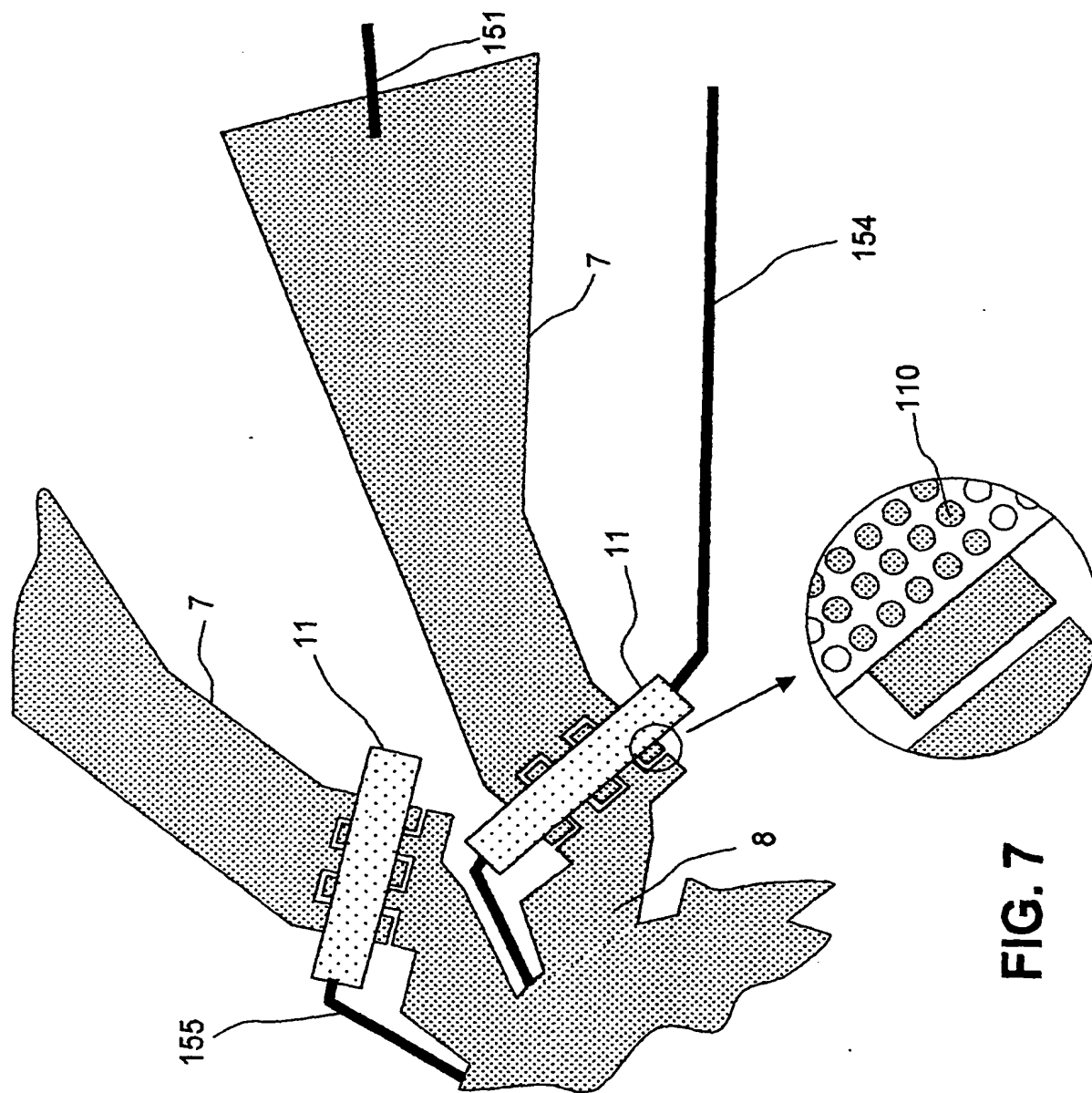
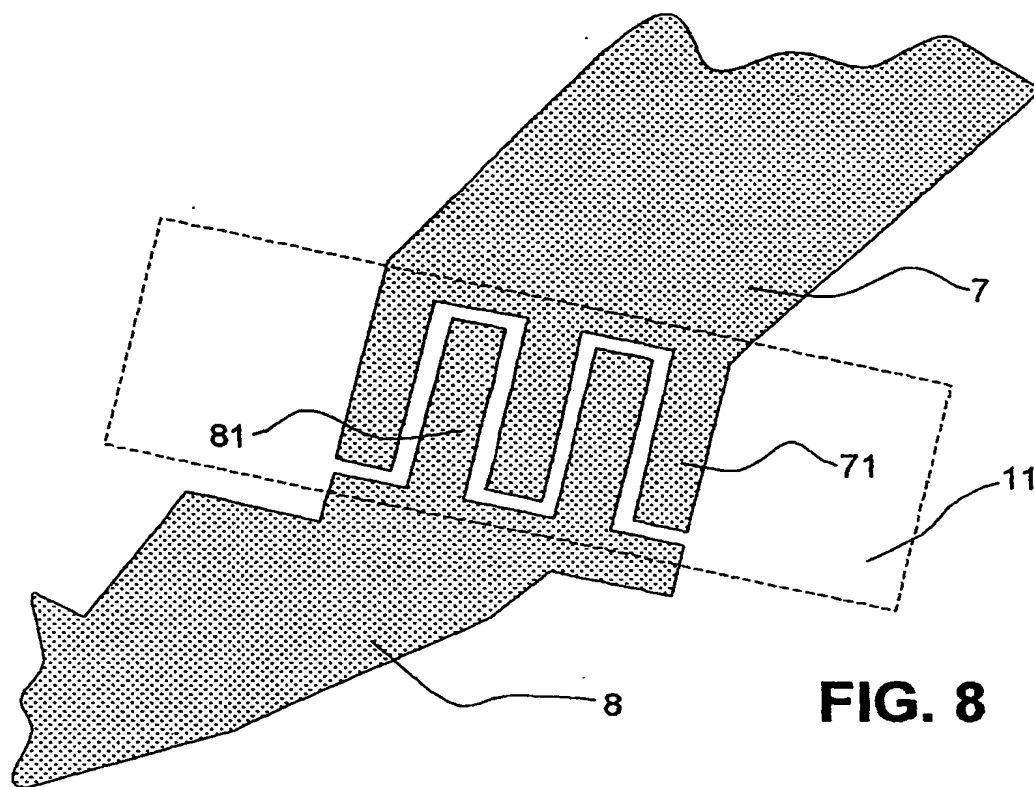
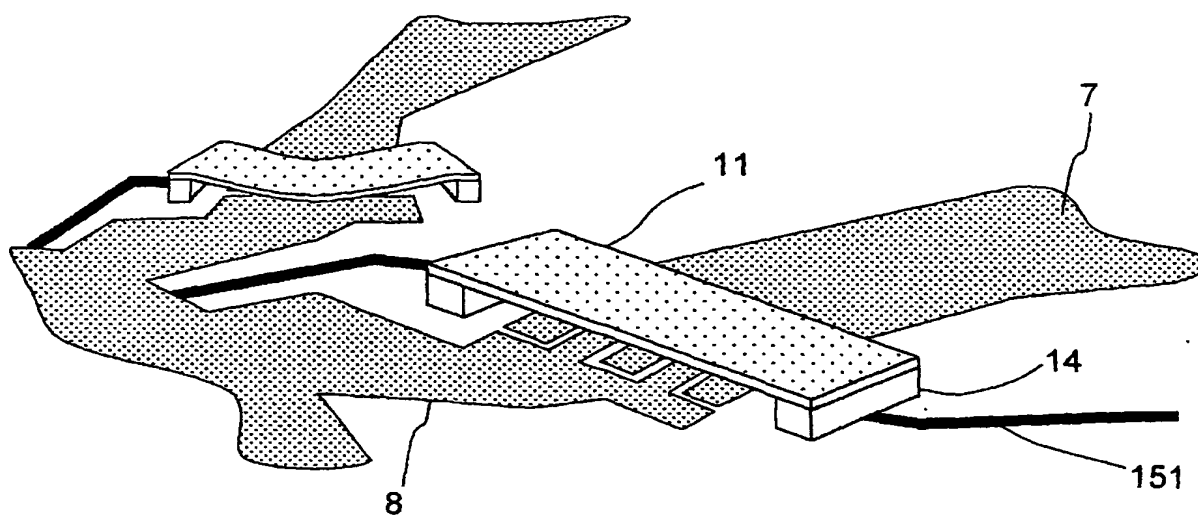


FIG. 7



**FIG. 8**



**FIG. 9**

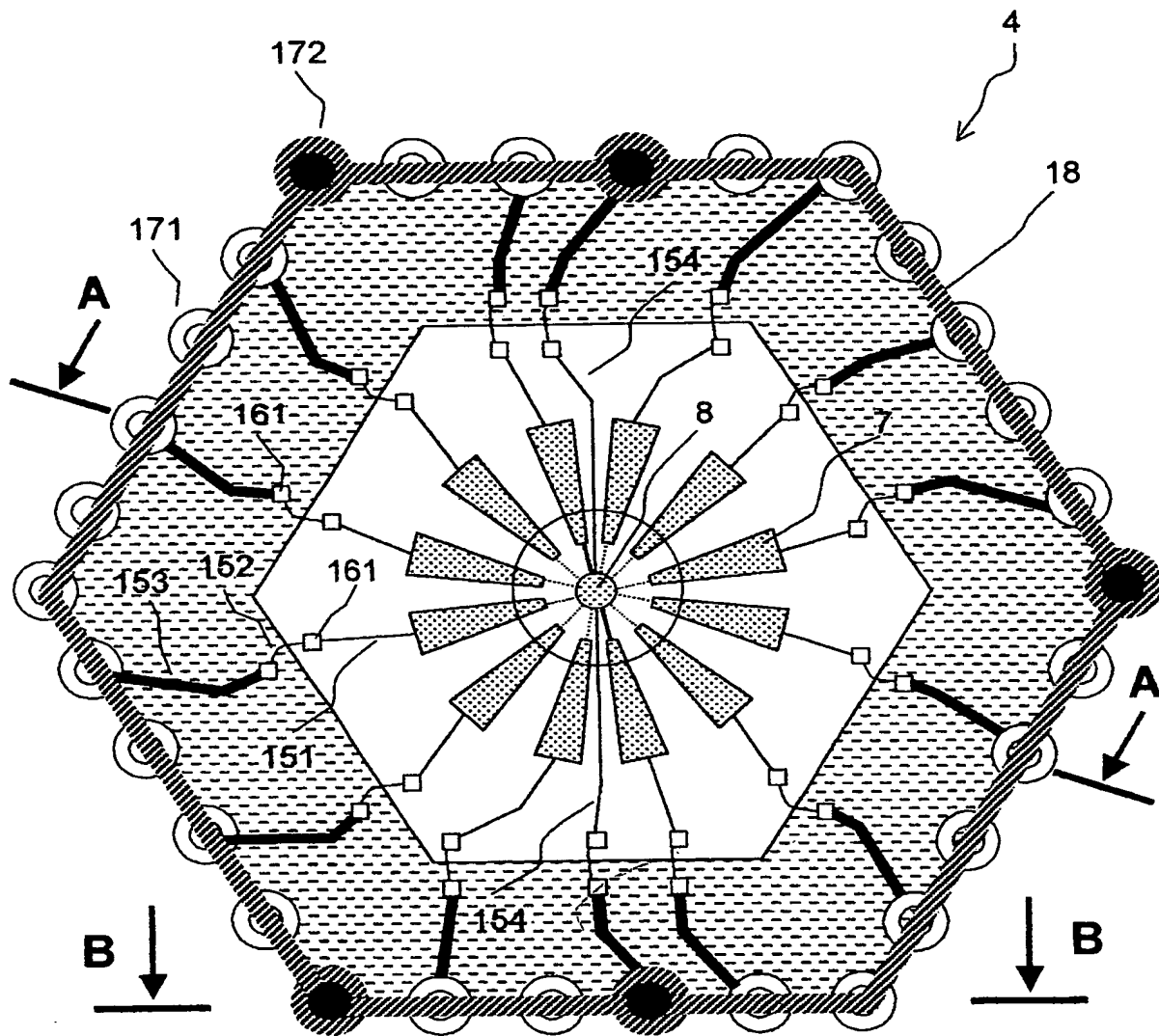
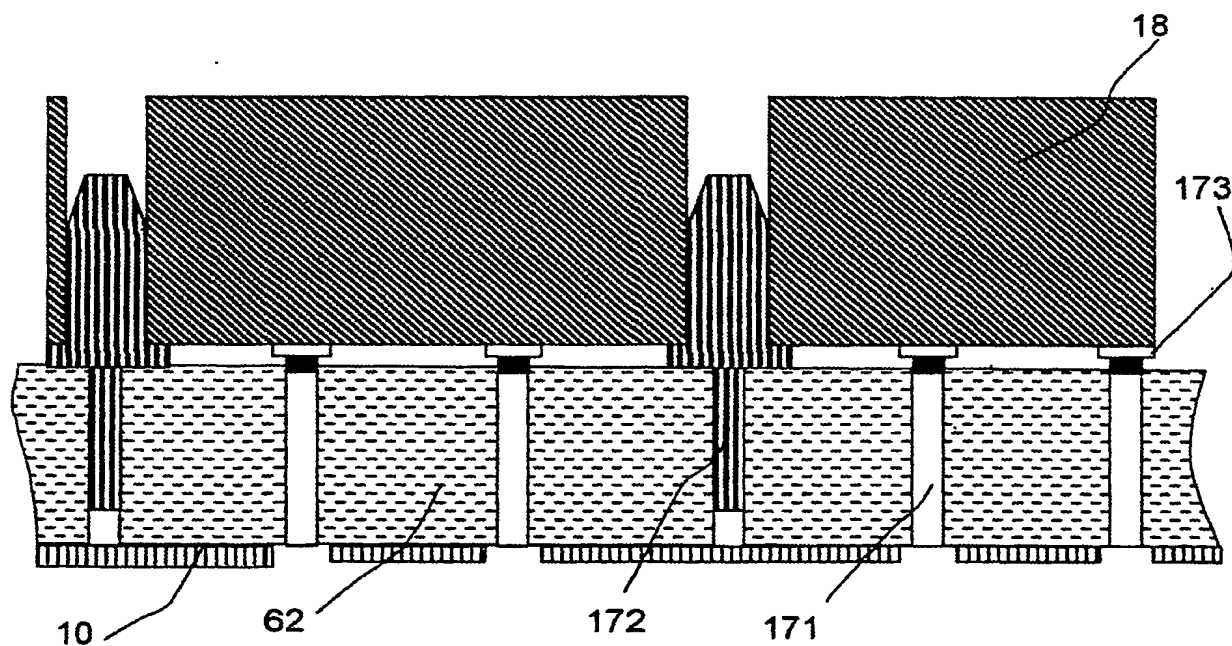
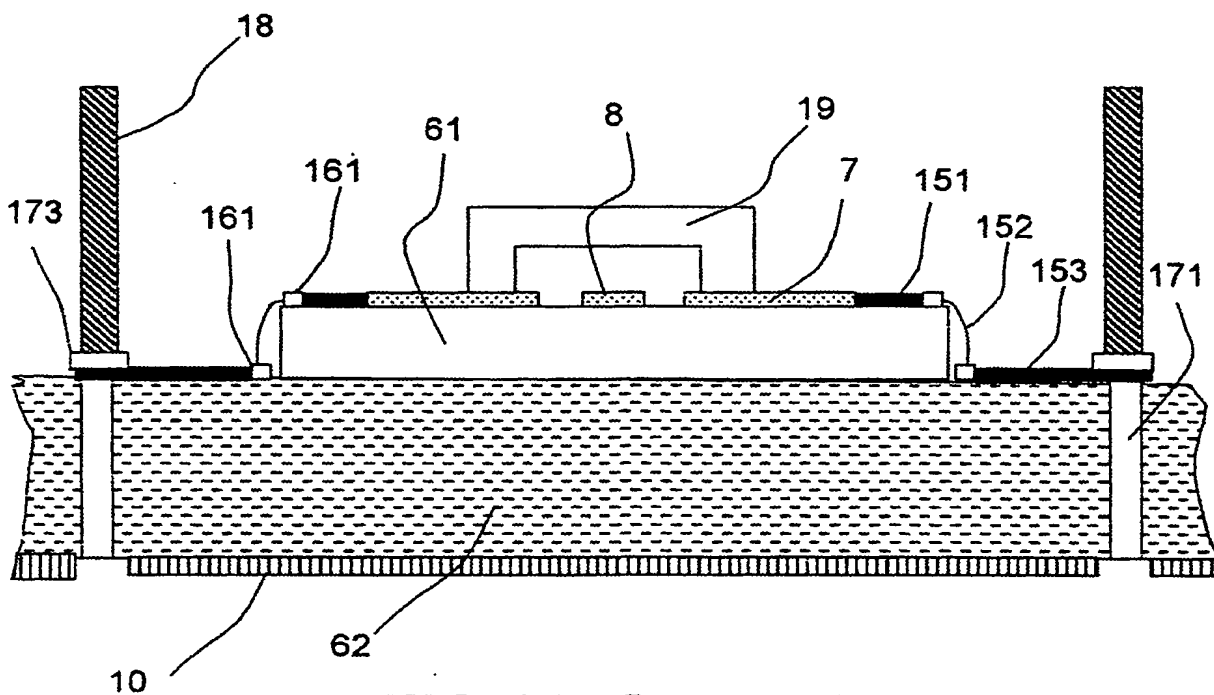
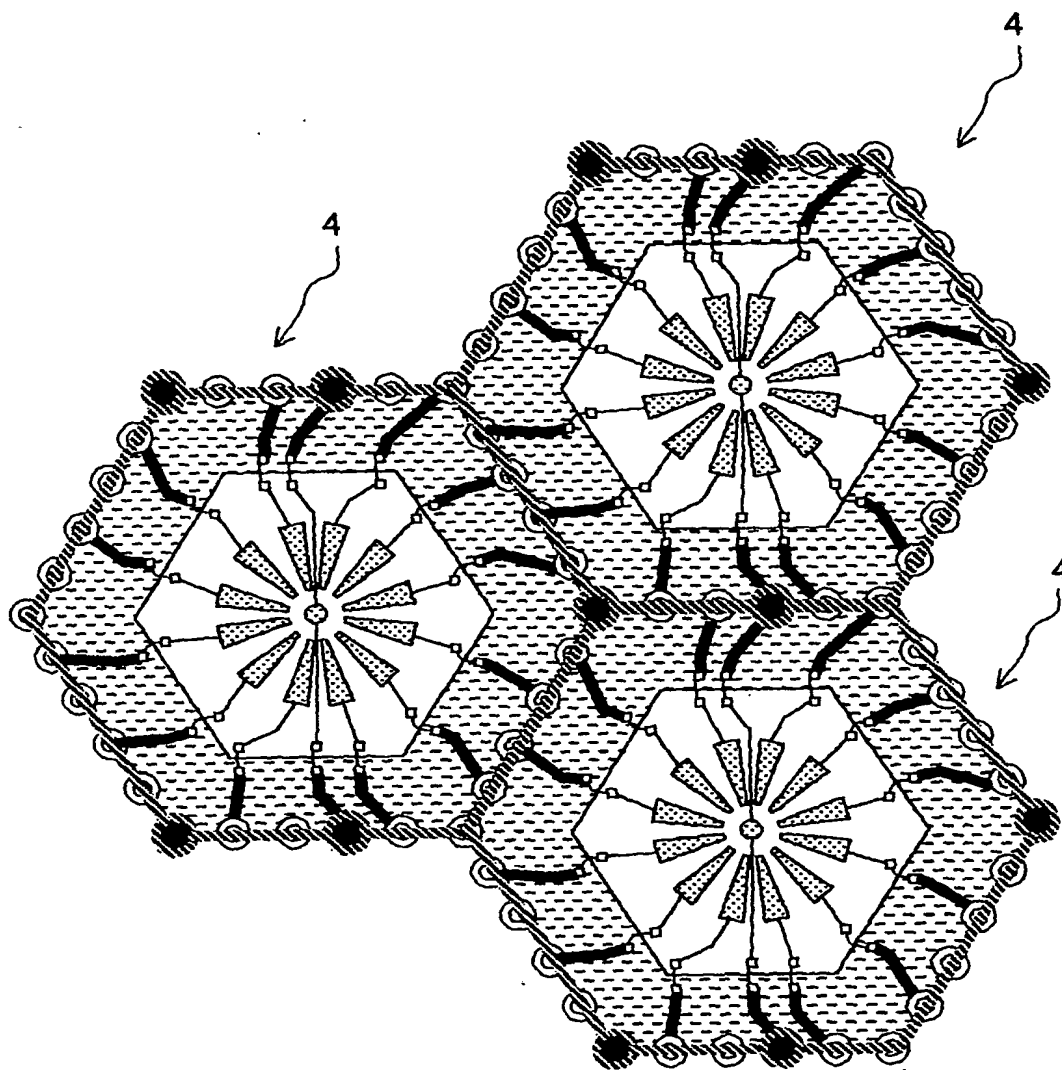


FIG. 10



**FIG. 13**